第 37 卷第 13 期
2017 年 7 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.13
Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201601200138
范育鹏,乔琦,方琳.产业生态系统新型定量研究方法综述.生态学报,2017,37(13):4599-4609.
Fan Y P, Qiao Q, Fang L.Review of innovative quantitative research methods for studying industrial ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4599-4609.

产业生态系统新型定量研究方法综述

范育鹏,乔　琦*,方　琳
中国环境科学研究院, 北京　100012

摘要:产业生态系统研究已成为当今学术界、产业界的研究重点和热点,对于充分利用资源、减轻环境压力、改造升级传统产业都具有不可估量的科学指导意义。目前,国内外对产业生态系统的研究定性较多,包括概念,特点,建设原则和经营理念的描述,而定量较少。然而,产业生态系统在发展当中也出现了大量的实际问题,急需加强对其定量研究,从而发现、提高和改进产业生态系统的结构及效率,增强可持续性。从近些年生态学的先进理论成果入手探讨了定量研究产业生态系统的一些方法——能值、(火用)、生态足迹和生态信息的方法。对这些方法的理论基础、发展历程、实践应用和适用特点依次进行了详细的梳理和归纳,并基于 3 个基本原则(生态维度和经济维度的整合,系统长期的恢复力,系统的广度和强度性质)对各个方法进行了综合比较分析,旨在为产业生态系统研究提供方向和理论指导。

关键词:定量分析;整合;产业生态系统;核算框架;弹性

Review of innovative quantitative research methods for studying industrial ecosystems

FAN Yupeng, QIAO Qi*, FANG Lin
Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Industrial ecosystem is an artificial system established in industries under the guidance of the theory of industrial ecology. Similar to a natural ecosystem, an industrial ecosystem achieves circulation of materials and utilization of energy cascade through cooperation between the enterprises and the organizations within a certain range of time and space. Construction of a successful industrial ecosystem can use waste to replace raw materials, utilize energy extracted from nature, reduce raw material and energy consumption, and curtail waste management costs, resulting in economic and environmental benefits. Research on industrial ecosystems, both locally and internationally, has gained importance and has become vital for promoting sustainable development of the society. At the same time, research on industrial ecosystem has been promoted in many areas and fields. Results from these studies provide significant scientific guidance to our society in achieving social and economic development while making optimal use of resources, reducing environmental pressures, transforming the traditional industries into more advanced ones, and upgrading the industrial eco-efficient level. It is increasingly accepted that construction of an industrial ecosystem is the key to realizing a circular economy, and it is a practical and important tool for achieving sustainable development. However, there are a number of practical problems in developing an industrial ecosystem. To address these, there is an urgent need to strengthen the research inputs for industrial ecosystem, especially, in order to discover, enhance, and improve their structure and efficiency, and thus promote its sustainable development. At present, qualitative studies on industrial ecosystems are relatively more, and include studies on

基金项目:国家自然科学基金项目(71373248)
收稿日期:2016-01-20;　　**网络出版日期**:2017-02-23

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: qiaoqi@craes.org.cn

their concept, characteristics, construction principles, and business philosophy. Quantitative studies about the system mechanism are few, and many of these are conducted using the Index Evaluation System. This approach, especially for integration research on systems, has drawbacks. The essence of the management of industrial ecosystem is to regard and manage the economic activities and the natural environment as an organic whole, and to establish a new mode of management that integrates the ecological and the economic dimensions. Given these, this paper discusses four innovative quantitative methods to study industrial ecosystem from a systems perspective. These include emergy analysis, exergy method, ecological footprint, and ecological information analysis. The theoretical basis, development process, application, and characteristics of these methods are summarized in detail. Finally, based on the basic principles of the theory of industrial ecology (which are, 1. integration of ecological and economic dimensions, 2. the long term resilience of system, and 3. considering the extensive and intensive properties at the same time), we conducted a comprehensive comparison of these methods with an intent to provide direction and reference for future research on industrial ecosystems.

Key Words: quantitative analysis; integration; industrial ecosystem; accounting framework; resilience

产业生态系统是一个特殊的人工复合生态系统,有赖于自然界提供的资源和服务,具有物质、能量和信息流动的特定分布,其核心是通过对自然生态系统运行规则的模仿,推进产业系统的发展和进化,形成一个与自然相互协调发展的复合生态系统[1]。它通过企业间的工业共生充分利用生产过程中产生的各种副产品/废物,达到物质能量利用效率最优化。建立产业生态系统是实现循环经济的关键,是实施可持续发展具体而重要的实践工具。然而在发展当中,也出现了大量的实际问题[2-3]。有必要加强对其分析,从而发现、提高和改进系统结构及效率。产业生态系统研究除了定性的研究方法外,使用较多的定量方法有:产业代谢分析,物质流分析,生命周期评价,投入产出分析,及指标评价法。前四种方法比较直观,但更多强调于产业生态系统的某些环节, 忽略了整体的结构性和协调性[4],虽可以很好地确定产业系统的物质、能量流动,但很难确定系统各单元之间的关系,以及系统整体表现所对应的内在功能和特征[4];而指标评价法则容易割裂系统单元之间的联系,不能从内在机理上反映系统的本质。模拟自然生态网络等方法过于依赖与自然生态系统的类比,而忽略了产业生态系统的特殊性[5]。同时这些研究很少有针对系统机理的探索,也很少辨析研究方法的不同特点,对研究背景的发展演变以及适用性的分析也涉及不多。

本文围绕 4 种在产业系统运用中较为创新的方法——能值、(火用)、生态足迹和生态信息的方法,对其内涵及发展、研究应用、方法特点等方面进行详细梳理和归纳、分析和展望。

1 方法综述

1.1 内涵及发展

1.1.1 能值分析

能值分析法就是为了统一系统中的各种物能流而创立[6],以生态中心视角计算转移到产品和服务中的自然资产[6]。物能流通过太阳能值转换率(即单位能量或物质所含太阳能值量)转换为能值[7],为产业生态系统进行综合分析开辟了定量研究新方法,提供了比较各种物能流的共同尺度。对于产业生态系统,产品/服务 k 生产过程中的太阳能值 P_k是:$P_k = \sum_i Tr_i E_i$, $i=1,\cdots,n$. Tr_i是物能流 i 的能值转换率,E_i是能源 i,k 的能值转换率如下:$Tr_k = \frac{P_k}{E_k} = \frac{\sum Tr_i E_i}{E_k}$ 。式中 E_k是 k 生产过程中所需能量。能值以太阳能焦耳度量,能值转换率可以参考 Odum[6]。

对产业生态系统的能物流、货币流、信息流进行能值分析,建立能值指标体系。1 环境负荷率(ELR):购买能值(F)与不可再生能值(N)之和与可再生能值(R)的比率($(F+N)/R$),可反映产业生态系统的压力和负

荷。比率大表明能值使用水平高,是先进系统的典型特征,也表明产业发展对环境资源的压力高[8];2 环境产出率(EYR):过程产出能值(Y)与从外界购买能值(F)的比率(Y/F),是购买能值的产出量度。高环境产出率表明系统只需较少的能值输入便可产出较高能值;3 可持续性指标(SI)可用 EYR/ELR 表示,可描述单位环境负荷的资源产出对系统贡献的量度。SI 越高,系统就越可持续。

1.1.2　火用分析

(火用)来自热力学定律,是对能量有用部分的度量。和能值不同,火用在一个封闭系统中不守恒,故能评价能量利用的有效性。火用可理解为系统变化到与环境平衡的状态时可完全转化为其他形式能的能量[8]。Jørgensen 提出了火用在生态学特定背景下的利用——生态火用。考虑到系统成熟态与平衡态之间结构和信息内容的不同[9],一个具有较多生物量和信息量的系统,就意味着具有较高水平的复杂度和生态火用[9]。生物系统的生态火用必须根据信息复杂度以及系统的化学自由能和其他物理形式的火用来计量[9]。已有多种生物和环境系统的生态火用被计算出来,而经济流的生态火用计算仍在发展中[10]。

产业系统产品生命周期内所有的火用耗可用积累火用耗法计算,包含从自然环境到最终产品的全部过程。火用法不能直接计算非能量流,如产业系统中的劳动力和资本流。需开发积累火用耗法的扩展方法,尤其是延伸火用分析法,来计算劳力、资本和环境污染修复成本的火用值[11-12]。非能量流通过消耗环境资源才能实现,故可用等量的火用值来表达。根据热力学第二定律,所有过程(不可逆)均导致火用损失,使得火用输出少于输入。因此可用火用的输出与输入值的比表示一个过程或产品的火用效率,包括物质流、资本流、劳动力和环境损失。为此需要利用延伸火用分析法为资本、劳动力和环境损失分配转换因子,如资本和劳动力的延伸火用转换因子可用从环境输入的火用EX_{in}与投资金额和工作时数的比来表示[12-13]。

$$ee\,c_C = \frac{EX_{\text{in}}}{M}\,(\text{KJ}/\,\$\,)$$

$$ee\,c_L = \frac{EX_{\text{in}}}{n}\,(\text{KJ}/\text{n})$$

式中,M 指从社会中可获得的现金量,即广义货币,n 代表给定系统中的工作时数,$ee\,c_C$ 是单位资本的火用耗,$ee\,c_L$ 指单位劳力的火用耗。环境损失可用环境修复成本表示,如通过把污水处理到环境基准状态所消耗的火用来测量。每个处理过程的火用都要用延伸火用分析法从能量、资本流和劳动力依次计算。

1.1.3　生态足迹分析

生态足迹的概念来源于生态经济学,自然资产的评估和维护是生态经济学的主要议题[14-15]。生态足迹支持者认为,传统的自然资产货币价值不足以反映自然资本的实际损耗。目前使用恒定货币估值的自然资产估值方法在实际存货缩水的情形下会产生误导。生态足迹旨在提供一个测量真实自然资产的方法[16-21],故能进行产业生态系统的分析[22-23]。

生态足迹之所以吸引学者是因为它提供了一个直观地表达生态资源的方法。生态足迹是指生产一定量的资源和吸纳废弃物所需要的生物生产性土地面积[24],生态足迹供给是指某一区域所能提供的生物生产性土地面积,也称生态承载力,表征该地区的生态容量,如维持光合作用和积累可用生物量的土地和水体的面积[25]。生物生产性面积分为 6 类:牧场、耕地、林地、渔场、建设地、及碳地[25](吸收产业系统排放的 CO_2 所需用地)。生态足迹大于生态承载力为生态赤字,反之则为生态盈余,此结果可测度产业系统人均占有资源量与生态承载力之间的关系,衡量系统可持续的程度。

与能值法和火用法相似,生态足迹分析把不同土地类型的生态资源转化成共同单位——全球公顷。每种类型土地的全球公顷基于其生产能力确定。如耕地比混合型用地生产力更强,故可转化为一个相对较多的全球公顷。不同国家和类型的土地生产力也随着当地自然景观和土地管理的不同而不同[15,26]。

产品和废物的生态足迹由食物、住房、运输、消费品、服务的类别所决定。6 种类型土地需要维持各自消耗所需的面积都被估算出来,如生产生物资源的生态足迹通过下式得出:

$$EF_p = \frac{P}{Y_n} \cdot F_y \cdot F_e$$

式中,P 是产品数量,如食物产量、碳排放量等,Y_n 是 P 值的国家平均值,F_y 和 F_e 是土地利用类型的产量因子和均衡因子。产量因子测量当地和世界各种土地类型平均生产力的差异,随着国家、土地类型和时间的不同而不同。均衡因子把特定土地换算成全球公顷,即世界平均生物生产面积,它随着土地类型和时间的不同而不同。资源消耗的生态足迹 EF_C 可用下式计算:

$$EF_C = EF_P + EF_I - EF_E$$

式中,EF_P 是产业系统实际生产的生态足迹,EF_I 和 EF_E 是进口和出口的生态足迹。若自然资源消耗大于可用资源,意味着产业系统超负荷发展或资源供给不足[27]。

1.1.4 生态信息方法

生态信息方法是一种利用信息科学的整体测量法,包含系统强度和广度维度。生态信息方法源自概率论和图论,可分析网络中的能/物流并从整体上分析产业系统的结构[28]。该方法采用面向系统的模式,强调网络整体性能,对节点关注可能不太明显,而是着重考虑节点之间的关联[29]。生态信息法审查系统中交互网络内流动配置的情况,可以揭示系统应对压力的弹性。生态信息法和工程柔性更加相关,可测量系统稳健地传输资源的能力。它也为定量研究生态韧性提供了重要的一步。利用香农多样性指数,这个方法用系统总不确定性 H 代表网络在任何观察之前的总不确定性,用生态术语来讲就是系统进化或自组织的潜力。H 可分解为两个变量 $H=X+\Psi$[30]。Ψ 是观察到 T_{ij} 流后系统剩下的不确定性,X 表示通过观察流之间的连接确定的不确定度。对一个网络系统而言,上述变量可用下式表示[31]:

$$H = -k\sum_{ij}\frac{T_{ij}}{T_{..}}\log\frac{T_{ij}}{T_{..}}$$

$$X = k\sum_{ij}\frac{T_{ij}}{T_{..}}\log\frac{T_{ij}T_{..}}{T_{i.}T_{.j}}$$

$$\psi = -k\sum_{ij}\sum_{ij}\frac{T_{ij}}{T_{..}}\log\frac{T_{ij}^2}{T_{i.}T_{.j}}$$

式中,T_{ij} 是节点 i 到 j 的流,$T_{i.} = \sum_j T_{ij}$ 是离开节点 i 的总流量,$T_{.j} = \sum_i T_{ij}$ 是进入节点 j 的总流量,$T_{..} = \sum_{ij} T_{ij}$ 是系统总流量。

信息理论中,变量 X 指平均交互信息,是离开节点 i 的流的不确定性与观察到 T_{ij} 以后的不确定性之间的差别,可以理解为网络中所有流的限制度。变量 Ψ 为条件熵,是网络中所有流的平均自由度。给定一个离开节点 i 的流的限制度,Ψ 可以看作去往节点 j 的流剩下的路径选择。X 和 Ψ 均无量纲,取决于所用的对数底数。

系统总流量代替常数 k 可产生 3 个新参数:聚集的系统不确定性 C,被称为系统容量,平均交互限制因子 A 被称为系统优势,条件熵 Φ 则为系统冗余度[32]。

过度冗余的系统将停滞增长,而过度有效的系统较脆弱,在遭受压力时易崩溃。为了确定效率和弹性间的平衡,引入系统的相对阶:$\alpha=A/C, 0\leq, 0\leq\alpha\leq\leq 1$。相对阶是系统内反对效率和冗余趋势的结果[33],以相对阶乘以自身的负对数,鲁棒性 R 可以表示为[34]:

$$R = -\alpha\log(\alpha)$$

式中,R 是描述系统限制度、优势度和系统冗余、自由度之间平衡的度量指标。1 的对数为 0,很明显系统朝任一方向发展都会走向极端,如具有很少的优势或很少的冗余时,系统的鲁棒性趋于零。一个系统最佳的鲁棒性水平依赖于环境、发展阶段、压力水平和形成机制。找到产业系统最佳水平的鲁棒性需要模仿自然系统。然而自然系统受到强有力且无情的演化动力学机制形成,在产业系统的网络中利用相同的过程实现类似的活力,不大可能或不会令人满意[35]。

1.2 应用

1.2.1 能值分析

能值分析经常被运用到跨学科研究中,如评价区域和国家的可持续性[36-37],评价自然生态系统[38-39]和城市生态系统的代谢[40-41];评价农业生态系统的生产效率[42-43]。在工业生态系统的评价方面,Wang 等人对朔州生态工业园进行了能值分析[44];Taskhiri 等人对生态工业园区的中水回用网络进行了能值分析[45];Geng 等学者利用能值分析法对沈阳经济开发区的工业共生情况进行了评价[46]。这些研究均成功地对产业系统进行了清晰分析,剖析了能值输入及过度依赖当地不可再生资源所致的风险。为决策者深入了解资源效率、制定政策提供了依据。

1.2.2 火用分析

火用的首次运用是在 20 世纪 70 年代确定工业过程和装备的效率。目前多种能物流的火用值均有计算,如化学燃料[47],农产品[48-49]。积累火用耗法能够贯穿产品生命周期表明火用消耗的效率,已经用在有详细统计资料地方的整体经济分析中,包括沙特阿拉伯[50],丹麦[51],墨西哥[52],西班牙[53],伊朗[54]甚至全球[55]。Valero[56]等人利用火用分析法对生态工业园区的工业共生进行了分析。

延伸火用分析法已被许多国家和地区采用,包含加拿大[57],土耳其[58],中国[59-60],和北京[61]。这些研究对象分为不同产业,如交通、农业、金融、服务业、工业及周边环境等,代表各部门之间能量、物质、资金、劳力的火用流被计算出来。研究结果强调了各部门的火用效率并指出政策可以提高效率水平。Sciubba 等[12]利用延伸火用法分析了锡耶纳省,发现此法可用来指导区域产业高效使用能源。Sciubba[13]将延伸火用分析运用到热电联产企业的优化设计中,表明延伸火用分析是进行系统优化的有效工具。

1.2.3 生态足迹分析

生态足迹分析可运用到不同规模上,然而多数都集中在国家尺度上因为大部分数据都可从国际组织获得。许多生态足迹分析表明大多数发达国家都是不可持续的[25,62-63]。Wackernagel[62]等研究得出在给定时间人类总生态足迹超过了地球资源再生的能力。生态足迹分析的支持者认为一个系统的足迹若大于自身的生态承载力,将会毁坏系统自然资产的再生能力,为此必须引入外部资源,减少资源消耗,加强技术创新[63-64]。除此外生态足迹广泛应用于多个产业。有一些学者对水产养殖业进行了研究[65-66];Gössling[67]、Castellani[68]等人都运用生态足迹对旅游业进行了研究;Wright[69]、Flint[70]分别对学校的生态足迹进行了分析。Budihardjo 等[71]对印尼三堡垄工业园区进行了生态足迹分析,发现三堡垄工业园区的发展已超出了其环境承载力,需要加强园区的生态化建设促进其可持续发展。

1.2.4 生态信息方法

生态信息法最初用来分析食物网[72],测量生态系统的压力水平[73-74]。最近这种方法已用来从结构和组织关系的角度定量探索系统的鲁棒性[75-76]。生态信息法不仅应用于自然系统[77-78],也有一些应用到产业系统[79,75]。Lu[80]等人应用生态信息的方法对北京生态工业园区的碳代谢进行了分析,研究表明整个系统受来自外部环境初级产品的供应和最终需求支配,通过一个部门的碳流量越多,它对整个系统的影响就越大,生态工业园区的碳代谢可以看作是一个高效发展中系统,但这可能是以更高水平的弹性为代价的。

1.3 方法特点

1.3.1 能值分析

能值分析法在生态建模初期可能是定量评估系统最强有力的工具,客观地量化了环境输入,最早在生态和经济领域之间建立了联系。然而具体分析中仍存在一些挑战。首先,可持续性指标是建立在 EYR 和 ELR 关系的基础之上,但这种关系尚不清晰。可持续性指标在很大程度上依赖于所研究系统的特殊性[81-82]。此外可持续性指标仅偏好于较多的可再生能值,较低的环境压力和较少的能值输入,并没有考虑能值流入和环境压力的最小限制,这些限制对于系统抵抗冲击和抗干扰的能力是关键的。能值分析法在保持统一各种流的优势时,在很多情形下也由于能值转换率缺乏而不能计算。经济学家从以人类为中心的视角批判了能值分析

法,认为统一系统内各种流的能值忽视了生产需要和经济效用的基本原则[83],能值方法支持者则认为此方法原则上就应是反对以人类为中心,而要支持自然是一个整体系统,人类只是其中的一部分[7]。支持者还认为能值分析法使用以生态为中心的模式评价所有流,这与系统稳定发展和环境福祉更为相关。

能值分析法在选择合适的时空边界时遇到了挑战。特别是要计算跨越地质年代的所有太阳能输入,才与能值的概念真正相符合,这是不可能达到的。某些学者如 Cleveland[83]等人认为能值分析仅能获取能流的热力学质量的这一方面,尤其是将一个单一总括的转换系数运用到各种产品和服务中,而不考虑时空变化,会造成严重错误。

能值分析法没有被大范围采用的另一个主要原因是能值转换率的不确定性。另外有很多尝试去建立能值分析法和其他热力学分析法之间的联系,但这种关联尚未形成[84-85]。因此能值分析被生态学以外学科的从业者多少有些怀疑[81]。

1.3.2　火用分析

火用最初应用于工程学的技术体系,渐渐地应用到其它学科,在环境科学方面尤其具有深刻的见解,对资源核算及确定低效都很重要。火用分析的最新发展,尤其是延伸火用分析法,试图把产业方面如资金流和劳力流与环境资源流统一到一个普通的分析当中,旨在研究和模拟产业系统。运用延伸火用分析法可说明不同部门如何能以不同的效率利用劳力和资金,然而这要假设系统所有效率增加都是积极贡献,没有权衡效率增加产生的利弊。在火用的文献中没有与能值分析中的评价指标体系相似的指标体系。这可能是由于能值分析区别设置了可再生、不可再生、引进、产生的物/能流,并在之上建立指标体系,火用分析法没有做出这样的区分。

火用在数学上是强健的,但用来量化研究产业生态系统有许多基本限制。首先,尝试去计算一切能流的转换和效率,非常困难或不能实现,尤其在积累火用耗法和延伸火用分析法中,由于系统中各种流之间相互关系的复杂性很难得到精确评估[86]。其次虽然在产业系统的模型中包含经济流是必需的,延伸火用分析法所用的方法从经济学角度来看不符合常规。如 Dewulf [87]所述,在延伸火用分析法中包含经济流的尝试并不成熟,需进一步发展。

1.3.3　生态足迹分析

生态足迹分析的主要优势就是能够用统一的土地面积来表达人类开采自然的总量。这需要两个假定,其一,所有生态、生物资源和产生的废物都能被测量;其二,资源和产生的废物可转换为相应的生物生产性面积[88]。与其他聚合指标相似,生态足迹在统一各种物/能流时因失去细节而被指责。第二种假设受到了较多批评。尤其是各种土地类型的换算方法中只有一种功能与土地面积相关。许多情形下,土地提供了多种功能,因此将影响到计算结果[65]。目前还有许多土地类型生态足迹方法还没有考虑,如地下资源[89-90]。

生态足迹法因把碳地当作固定产业系统排放 CO_2 的实际土地需求量而受到批判。生态足迹分析碳地时假设光合作用是唯一减少大气中 CO_2 的方法。如此以来该方法只测量林地,而忽略了其他土地。只要是认为仅有一种土地可以固定碳,就会导致对区域总足迹的估值偏高[15]。此外别的温室气体,如 CH_4 和 N_2O,在生态足迹方法中没有考虑[91]。

采用国家边界来进行生态足迹分析也受到了批判[92]。这意味着研究是以国家的自然资产自给自足[93-94]为先决条件, 忽视了不同国家获取生态资源的优势差异。一种替代方法是从环境角度确定边界,如基于水文或生态的边界。生态资源供需的时空维度需进一步调整,尤其是生态足迹分析不但要能审查进出口生态资源总量,还要能对自然资产交易的原产地和目的地进行详细设计[28]。

1.3.4　生态信息方法

生态信息方法的优势在于衡量产业系统鲁棒性的能力。生态信息方法擅长确定系统效率和冗余之间的均衡,然而它还没有找到这两个参数之间的最优平衡,需要进一步研究开发一个规范的判据。这个方法在整合系统各种维度方面的能力较弱。尽管系统的总流量反映了资源流的总量,该指标却不能表达资源的可用

性。此外,很难直观地理解这些度量系统的指标如优势、效率和冗余[95]。

2　综合分析

本文基于以下三方面:①有能力把生态维度和经济维度整合起来,②考虑系统长期的弹性,③考虑系统的广度和强度性质,对上述方法进行了比较分析(表 1),提出了优势,劣势和进一步的研究方向。

定量研究产业生态系统必须把生态和经济维度整合起来[96]。上述方法仅有能值、火用值和生态足迹可整合生态和经济维度。生态信息法只能用于单一的生态流或经济流,还没有用于整合生态和经济维度的物/能流。能值、火用、生态足迹 3 种方法是以生态视角为中心,系统所需的资源消耗量通过统一标准来核算。在能值分析中,资源消耗用太阳能焦耳描述,挑战主要考虑如何把经济流折算成能值单位。在火用分析中,能量单位用来表达系统有用的火用耗,火用分析提供了一个考虑生态维度的强大理论框架,但在经济维度测量上仍需进一步发展。生态足迹分析中,全球公顷作为一个共同土地单位得到应用。尽管生态足迹法的方法论有缺陷,却最具传播力,专家和非专业人士都很容易把资源联系到土地单位。

表 1　研究方法对比分析表

Table 1　Overview of research methods

研究方法 Methods	核心内涵 Core connotation	优势 Strengths	劣势 Weaknesses
能值法 Emergy analysis	所有能、物流转换成太阳能值	可整合生态和经济维度;分析思路简单	能值转化率不确定; 经济方面难以度量; 忽视系统内实体间的关联,缺乏网络视角; 不能进行拓扑分析 强度性质考虑较少
(火用)法 Exergy analysis	考虑能量的有效部分	可整合生态和经济维度	经济方面难以度量; 忽视系统内实体间的关联,缺乏网络视角; 不能进行拓扑分析 强度性质考虑较少
生态足迹法 Ecological footprint	所有资源换算成土地面积	可整合生态和经济维度;直观,传播性强	理论范围涵盖不全,如忽略了地下资源和水资源与污染排放的生态影响; 忽视系统内实体间的关联; 只从存量的角度进行核算; 产量因子的局限性 缺乏网络视角,不能进行拓扑分析 强度性质考虑较少
生态信息法 Ecological information method	利用现代计算技术(如人工神经网络、进化计算和代理等)进行生态学分析	拓扑结构研究;系统复杂性研究;网络分析;	不能整合生态和经济维度 广度性质测量较弱 分析复杂

另外如何权衡多个系统级别的性能,对系统可持续发展有着重要影响。3 种会计核算方法—能值,火用和生态足迹,根据破坏环境再生能力的低效产出或过度消耗突出自然资源的不可持续利用。然而它们在系统的拓扑维度方面是没有贡献的,也忽视了系统内实体间物/能流交换的变化和大小。生态信息方法尤其关注系统的拓扑维度,能够确认增加系统效率的利弊得失。然而有些系统级别的权衡被所有方法都忽略了,如杰文斯悖论所提出的效应——系统效率的增加会导致资源总消耗的增加[97],需进一步探索这个系统隐含的平衡关系。

若在核算方法中缺乏网络视角,会产生两方面的问题。第一,系统健康发展是否能够单独地通过降低资源总消耗来实现。第二,核算视角没有考虑系统对变化如扰动、压力或外部冲击的动态响应。由压力如经济衰退所致的网络恢复力的改变,是影响系统健康发展的一个重要方面[98]。核算方法考虑增加效率作为减少资源总消耗的一种方法,然而这些方法没有考虑效率增加的限制。因为系统效率和冗余之间存在着权衡,这是生态信息方法的关注点[99]。若一个系统效率过高,这将减弱系统对抗外部冲击和干扰的能力,而如果一个

系统过度冗余,将使得系统维护成本昂贵,阻碍系统内部发展,并且削弱系统有序分配流的能力[76]。论述方法中仅有生态信息方法考虑到系统的恢复力。然而确切地讲,生态信息方法考虑的是工程柔性或鲁棒性,将来的研究需要扩展此方法以涵盖生态韧性的自适应能力。

上述方法均不同程度地考虑了系统的广度和强度性质。能值、火用、生态足迹的核算方法主要考虑低效生产和资源过度消耗。在系统规模确定的情况下核算方法假定提高效率是降低系统受到影响的唯一方法。因此核算方法主要考虑系统的广度性质,唯一考虑的强度性质是效率。生态信息法主要考虑强度性质如恢复力、效率和冗余度,而在测量广度性质方面是薄弱的。将来的一个研究热点是生态信息方法和核算方法能够以某种方式融合,更好地考虑系统的广度和强度性质。

3 结语

本文对研究产业生态系统的四种方法进行综述,认为对产业生态系统进行量化研究正在发展和完善,具有十分重要的意义,可阐明其运行的内在机理与演化机制,要整合系统的生态和经济维度,同时又要考虑强度和广度性质,才能全面合理地反映系统本质。定量研究也可为研究者、决策者制定更加切实的方法、政策策略提供依据。

下一步研究要把生态信息方法和会计核算方法有机结合,更全面地考虑系统的广度和强度性质,加强生态和经济耦合。本研究所探讨的量化整合方法可以作为测量系统绩效的工具。然而这些方法是实际情形的自然简单化,隐含地假设了系统性质的某些重要方面。因此推进这些方法的进一步研究,对于指导产业生态系统的构建及其可持续发展是关键的,可更好地指导政策制定。

参考文献(References):

[1] Gertler N. Industry ecosystems: Developing sustainable industrial structures [D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1995.

[2] Baldwin J S, Ridgway K, Winder B, Murray R. Modelling industrial ecosystems and the "problem" of evolution. Progress in Industrial Ecology, 2004, 1(1/3): 39-60.

[3] 邓华. 我国产业生态系统稳定性影响因素研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

[4] 陈亮, 王如松, 杨建新. 鲁北工业生态系统分析. 环境科学学报, 2005, 25(6): 721-726.

[5] Allenby B R, Cooper W E. Understanding industrial ecology from a biological systems perspective. Environmental Quality Management, 1994, 3(3): 343-354.

[6] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.

[7] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. Ecological Engineering, 1997, 9(1/2): 51-69.

[8] Szargut J, Morris D R, Steward F R. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. Washington, DC: Taylor & Francis Inc, 1987.

[9] Jørgensen S E, Nielsen S N. Application of exergy as thermodynamic indicator in ecology. Energy, 2007, 32(5): 673-685.

[10] Jørgensen S E. Eco-Exergy as Sustainability. Southampton: Wit Press, 2006.

[11] Hau J L, Bakshi B R. Expanding exergy analysis to account for ecosystem products and services. Environmental Science & Technology, 2004, 38(13): 3768-3777.

[12] Sciubba E, Bastianoni S, Tiezzi E. Exergy and extended exergy accounting of very large complex systems with an application to the province of Siena, Italy. Journal of Environmental Management, 2008, 86(2): 372-382.

[13] Sciubba E. Beyond thermoeconomics? The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. Exergy, An International Journal, 2001, 1(2): 68-84.

[14] Häyhä T, Franzese P P. Ecosystem services assessment: A review under an ecological-economic and systems perspective. Ecological Modelling, 2014, 289: 124-132.

[15] Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity assessments. Land Use Policy, 2004, 21(3): 231-246.

[16] Chen B, Chen G Q, Yang Z F, Jiang M. M. Ecological footprint accounting for energy and resource in China. Energy Policy, 2007, 35(3): 1599-

1609.

[17] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 范晓秋. 水资源生态足迹计算方法. 生态学报, 2008, 28(3): 1279-1286.

[18] Cerutti A K, Bagliani M, Beccaro G L, Bounous G. Application of Ecological Footprint Analysis on nectarine production: methodological issues and results from a case study in Italy. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(8): 771-776.

[19] Wang S, Yang F L, Xu L, Jing D. Multi-scale analysis of the water resources carrying capacity of the Liaohe Basin based on ecological footprints. Journal of Cleaner Production, 2013, 53: 158-166.

[20] 陈敏, 王如松, 张丽君. 中国 2002 年省域生态足迹分析. 应用生态学报, 2006, 17(3): 424-428.

[21] Galli A. On the rationale and policy usefulness of ecological footprint accounting: the case of morocco. Environmental Science & Policy, 2015, 48: 210-224.

[22] Herva M, Franco A, Ferreiro S, Álvarez A, Roca E. An approach for the application of the Ecological Footprint as environmental indicator in the textile sector. Journal of Hazardous Materials, 2008, 156(1/3): 478-487.

[23] Butnariu A, Avasilcai S. Research on the possibility to apply ecological footprint as environmental performance indicator for the textile industry. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014, 124: 344-350.

[24] Wackernagel M, Rees W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island, BC, Canada: New Society Publishers, 1998.

[25] Kitzes J, Peller A, Goldfinger S, Wackernagel M. Current methods for calculating National Ecological Footprint Accounts. Science for Environment and Sustainable Society, 2007, 4(1): 1-9.

[26] Kitzes J, Galli A, Bagliani M, Barrett J, Dige G, Ede S, Erb K, Giljum S, Haberl H, Hails C, Jolia-Ferrier L, Jungwirth S, Lenzen M, Lewis K, Loh J, Marchettini N, Messinger H, Milne K, Moles R, Monfreda C, Moran D, Nakano K, Pyhälä A, Rees W, Simmons C, Wackernagel M, Wada Y, Walsh C, Wiedmann T. A research agenda for improving National Ecological Footprint Accounts. Ecological Economics, 2009, 68(7): 1991-2007.

[27] Turner K, Lenzen M, Wiedmann T, Barrett J. Examining the global environmental impact of regional consumption activities-Part 1: A technical note on combining input-output and ecological footprint analysis. Ecological Economics, 2007, 62(1): 37-44.

[28] Wiedmann T, Minx J, Barrett J, Wackernagel M. Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis. Ecological Economics, 2006, 56(1): 28-48.

[29] Ulanowicz R E. Growth and Development: Ecosystems Phenomenology. New York: Springer, 1986.

[30] Rutledge R W, Basore B L, Mulholland R J. Ecological stability: an information theory viewpoint. Journal of Theoretical Biology, 1976, 57(2): 355-371.

[31] Ulanowicz R E, Kay J J. A package for the analysis of ecosystem flow networks. Environmental Software, 1991, 6(3): 131-142.

[32] Ulanowicz R E. Information theory in ecology. Computers & Chemistry, 2001, 25(4): 393-399.

[33] Boltzmann L. Weitere studien über das wärmegleichgewicht unter gas-molekülen. Sitzungs Berichte Keiserl Akad der Wissenschaften, 1872, 66(2): 275-370.

[34] Ulanowicz R E. Quantitative methods for ecological network analysis. Computational Biology and Chemistry, 2004, 28(5/6): 321-339.

[35] Tisdell C. Ecosystems functions and genetic diversity: TEEB raises challenges for the economics discipline. Economic Analysis and Policy, 2014, 44(1): 14-20.

[36] Baral A, Bakshi B R. Emergy analysis using US economic input-output models with applications to life cycles of gasoline and corn ethanol. Ecological Modelling, 2010, 221(15): 1807-1818.

[37] Cai Z F, Zhang L X, Zhang B, Chen Z M. Emergy-based analysis of Beijing-Tianjin-Tangshan region in China. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14(12): 4319-4331.

[38] Morandi F, Campbell D E, Bastianoni S. Set theory applied to uniquely define the inputs to territorial systems in emergy analyses. Ecological Modelling, 2014, 271: 149-157.

[39] Li L J, Lu H F, Tilley D R, Qiu G Y. Effect of time scale on accounting for renewable emergy in ecosystems located in humid and arid climates. Ecological Modelling, 2014, 287: 1-8.

[40] Zhang Y, Yang Z F, Liu G Y, Yu X Y. Emergy analysis of the urban metabolism of Beijing. Ecological Modelling, 2011, 222(14): 2377-2384.

[41] Liu G Y, Yang Z F, Chen B, Zhang L X. Modelling a thermodynamic-based comparative framework for urban sustainability: Incorporating economic and ecological losses into emergy analysis. Ecological Modelling, 2013, 252: 280-287.

[42] Wang X L, Chen Y Q, Sui P, Gao W S, Qin F, Zhang J S, Wu X. Emergy analysis of grain production systems on large-scale farms in the North China Plain based on LCA. Agricultural Systems, 2014, 128: 66-78.

[43] Yang J, Chen B. Emergy analysis of a biogas-linked agricultural system in rural China-A case study in Gongcheng Yao Autonomous County. Applied Energy, 2014, 118: 173-182.

[44] Wang L M, Zhang J T, Ni W D. Emergy evaluation of Eco-Industrial park with power plant. Ecological Modelling, 2005, 189(1/2): 233-240.

[45] Taskhiri M S, Tan R R, Chiu A S F. Emergy-based fuzzy optimization approach for water reuse in an eco-industrial park. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(7): 730-737.

[46] Geng Y, Liu Z X, Xue B, Dong H J, Fujita T, Chiu A. Emergy-based assessment on industrial symbiosis-a case of Shenyang economic and technological development zone. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(23): 13572-13587.

[47] Ozbilen A, Dincer I, Rosen M A. Exergetic life cycle assessment of a hydrogen production process. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(7): 5665-5675.

[48] Ahamed J U, Saidur R, Masjuki H H, Mekhilef S, Ali M B, Furqon M H. An application of energy and exergy analysis in agricultural sector of Malaysia. Energy Policy, 2011, 39(12): 7922-7929.

[49] Chen B, Chen G Q. Resource analysis of the Chinese society 1980-2002 based on exergy-Part 3: Agricultural products. Energy Policy, 2007, 35(4): 2065-2078.

[50] Dincer I, Hussain M M, Al-Zaharnah I. Energy and exergy use in public and private sector of Saudi Arabia. Energy Policy, 2004, 32(14): 1615-1624.

[51] Nielsen S N, Jørgensen S E. Sustainability analysis of a society based on exergy studies-a case study of the island of Samsø (Denmark). Journal of Cleaner Production, 2015, 96: 12-29.

[52] Kerdan I G, Gúlvez D M, Raslan R, Ruyssevelt P. Modelling the energy and exergy utilisation of the Mexican non-domestic sector: A study by climatic regions. Energy Policy, 2015, 77: 191-206.

[53] Valero A, Carpintero Ó, Valero A, Calvo G. How to account for mineral depletion. The exergy and economic mineral balance of Spain as a case study. Ecological Indicators, 2014, 46: 548-559.

[54] Sanaei S M, Furubayashi T, Nakata T. Assessment of energy utilization in Iran's industrial sector using energy and exergy analysis method. Applied Thermal Engineering, 2012, 36: 472-481.

[55] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Mattar C. Recent trends in solar exergy and net radiation at global scale. Ecological Modelling, 2012, 228: 59-65.

[56] Valero A, Usón S, Torres C, Valero A, Agudelo A, Costa J. Thermoeconomic tools for the analysis of eco-industrial parks. Energy, 2013, 62: 62-72.

[57] Bligh D C, Ugursal V I. Extended exergy analysis of the economy of Nova Scotia, Canada. Energy, 2012, 44(1): 878-890.

[58] Seckin C, Sciubba E, Bayulken A R. Extended exergy analysis of Turkish transportation sector. Journal of Cleaner Production, 2013, 47: 422-436.

[59] Dai J, Fath B, Chen B. Constructing a network of the social-economic consumption system of China using extended exergy analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 4796-4808.

[60] Chen G Q, Chen B. Extended-exergy analysis of the Chinese society. Energy, 2009, 34(9): 1127-1144.

[61] Jiang M M, Chen B. Integrated urban ecosystem evaluation and modeling based on embodied cosmic exergy. Ecological Modelling, 2011, 222(13): 2149-2165.

[62] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfán I S L, García J M, Guerrero A I S, Guerrero M G S. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.

[63] Wiedmann T, Lenzen M, Turner K, Barrett J. Examining the global environmental impact of regional consumption activities—Part 2: Review of input-output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade. Ecological economics, 2007, 61(1): 15-26.

[64] Opschoor H. The ecological footprint: measuring rod or metaphor. Ecological Economics, 2000, 32(3): 363-365.

[65] Gyllenhammar A, Håkanson L. Environmental consequence analyses of fish farm emissions related to different scales and exemplified by data from the Baltic-a review. Marine Environmental Research, 2005, 60(2): 211-243.

[66] Roth E, Rosenthal H, Burbridge P. A discussion of the use of the sustainability index: 'ecological footprint' for aquaculture production. Aquatic Living Resources, 2001, 13(6): 461-469.

[67] Gössling S, Hansson C B, Hörstmeier O, Saggel S. Ecological footprint analysis as a tool to assess tourism sustainability. Ecological Economics, 2002, 43(2/3): 199-211.

[68] Castellani V, Sala S. Ecological Footprint and Life Cycle Assessment in the sustainability assessment of tourism activities. Ecological Indicators, 2012, 16: 135-147.

[69] Wright E P, Drossman H. The ecological footprint of the Colorado College: An examination of sustainability. Environmental Science, 2002, 5(1): 23-23.

[70] Flint K. Institutional ecological footprint analysis-A case study of the University of Newcastle, Australia. International Journal of Sustainability in Higher Education, 2001, 2(1): 48-62.

[71] Budihardjo S, Hadi S P, Sutikno S, Purwanto P. The ecological footprint analysis for assessing carrying capacity of industrial zone in semarang.

Journal of Human Resource and Sustainability Studies, 2013, 1: 14-20.

[72] Wulff F, Field J G, Mann K H. Network Analysis in Marine Ecology: Methods and Applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1989.

[73] Christian R R, Baird D, Luczkovich J, Johnson J C, Scharler U M, Ulanowicz R E. Role of network analysis in comparative ecosystem ecology of estuaries // Belgrano A, Scharler J, Dunne U M, Ulanowicz R, eds. Aquatic Food Webs: An Ecosystem Approach. New York, USA: Oxford University Press, 2005: 25-40.

[74] Baird D, Heymans J J. Assessment of ecosystem changes in response to freshwater inflow of the Kromme River estuary, St Francis Bay, South Africa: a network analysis approach. Water SP, 1996, 22: 307-318.

[75] Goerner S J, Lietaer B, Ulanowicz R E. Quantifying economic sustainability: implications for free-enterprise theory, policy and practice. Ecological Economics, 2009, 69(1): 76-81.

[76] Ulanowicz R E, Goerner S J, Lietaer B, Gomez R. Quantifying sustainability: resilience, efficiency and the return of information theory. Ecological Complexity, 2009, 6(1): 27-36.

[77] Chen Z Z, Qiu Y S, Xu S N. Changes in trophic flows and ecosystem properties of the Beibu Gulf ecosystem before and after the collapse of fish stocks. Ocean & Coastal Management, 2011, 54(8): 601-611.

[78] Vassallo P, Paoli C, Schiavon G, Albertelli G, Fabiano M. How ecosystems adapt to face disruptive impact? The case of a commercial harbor benthic community. Ecological Indicators, 2013, 24: 431-438.

[79] Bodini A. Building a systemic environmental monitoring and indicators for sustainability: what has the ecological network approach to offer? Ecological Indicators, 2012, 15(1): 140-148.

[80] Lu Y, Chen B, Feng K S, Hubacek K. Ecological network analysis for carbon metabolism of eco-industrial parks: A case study of a typical eco-industrial park in Beijing. Environmental Science & Technology, 2015, 49(12): 7254-7264.

[81] Brown M T, Ulgiati S, Can emergy sustainability index be improved? A response to Harizaj. Ecological Modelling, 2011, 222(12): 2034-2035.

[82] Harizaj P. Can the emergy sustainability index be improved? Ecological Modelling, 2011, 222(12): 2031-2033.

[83] Cleveland C J, Kaufmann R K, Stern D I. Aggregation and the role of energy in the economy. Ecological Economics, 2000, 32(2): 301-317.

[84] Sciubba E, Ulgiati S. Emergy and exergy analyses: Complementary methods or irreducible ideological options? Energy, 2005, 30(10): 1953-1988.

[85] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. Ecological Economics, 1996, 19(3): 219-235.

[86] Valero A. Exergy accounting: capabilities and drawbacks. Energy, 2006, 31(1): 164-180.

[87] Dewulf J, Van Langenhove H, Muys B, Bruers S, Grubb G F, Paulus D M, Sciubba E. Exergy: its potential and limitations in environmental science and technology. Environmental Science & Technology, 2008, 42(7): 2221-2232.

[88] Chambers N, Simmons C, Wackernagel M. Sharing Nature's Interest: Ecological Footprints as an Indicator of Sustainability. London, UK: Routledge, 2000.

[89] Moffatt I. Ecological footprints and sustainable development. Ecological Economics, 2000, 32(3): 359-362.

[90] 向书坚, 柴士改. 生态足迹若干不足、修正与完善以及应用拓展. 资源科学, 2013, 35(5): 1051-1058.

[91] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz B N, Erb K H, Haberl H, Krausmann F. Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges. Land Use Policy, 2004, 21(3): 271-278.

[92] Van Den Bergh J C J M, Verbruggen H. Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the "ecological footprint". Ecological Economics, 1999, 29(1): 61-72.

[93] Van Kooten G C, Bulte E H. The ecological footprint: useful science or politics? Ecological Economics, 2000, 32(3): 385-389.

[94] Simmons C, Lewis K, Barrett J. Two feet-two approaches: a component-based model of ecological footprinting. Ecological Economics, 2000, 32(3): 375-380.

[95] Blüthgen N. Why network analysis is often disconnected from community ecology: a critique and an ecologist's guide. Basic and Applied Ecology, 2010, 11(3): 185-195.

[96] 王如松, 欧阳志云. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 337-345.

[97] Alcott B. Jevons' paradox. Ecological Economics, 2005, 54(1): 9-21.

[98] McDaniels T, Chang S, Cole D, Mikawoz J, Longstaff H. Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation. Global Environmental Change, 2008, 18(2): 310-318.

[99] Ulanowicz R E. The dual nature of ecosystem dynamics. Ecological Modelling, 2009, 220(16): 1886-1892.